

УДК 631.95(476.7)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ КАРТОФЕЛЯ НА ПРИМЕРЕ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

*Волчек А.А., Мешик О.П., Волчек Ан.А.**Брестский государственный технический университет,**г. Брест, Беларусь*

Keywords: potato, yield, model, prediction

Summary: The potato yield analysis for Brest area is presented, determining the main climatic productivity factors. Long time potato yield observations for 1960–2012 years were used as the basis of research, as long as monthly average rain and air temperature for the same territory time period. Climatically unfavorable years have been shown to produce highest asynchrony of the weather component of potato yield. An approach to predict potato yield with one year advance is proposed.

Введение. Одним из основных направлений развития экономики Брестской области является сельское хозяйство. Этому способствует ее географическое положение, климатические особенности, а также крупномасштабные мелиорации, проводимые во второй половине прошлого столетия. По данным Министерства статистики и анализа Республики Беларусь на 1 января 2017 г. сельскохозяйственные земли в Брестской области составляли 1388,7 тыс. га, удельный вес мелиорированных сельскохозяйственных земель в общей площади составляет 54,7 %. Для обеспечения продовольственной безопасности страны необходимо получение стабильных и высоких урожаев. Поэтому анализ и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур является одной из важных задач.

Климатические колебания, учащение неблагоприятных метеорологических явлений, неуправляемость мелиоративных систем – все это в совокупности оказывает значительное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. В последнее десятилетие прошлого века наиболее сильно были выражены климатические аномалии, которые оказали заметное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур. Можно предположить, что зависимость сельскохозяйственного производства от климатических факторов усилится, несмотря на развитие культуры земледелия.

В настоящее время исследованиям климатообусловленной изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур посвящено много работ [2, 3, 4 и др.], тем не менее, задача решена далеко не полностью из-за сложности механизмов формирования урожая. Рост и развитие культурных растений зависят от технологических и климатических факторов. При отклонении от оптимума хотя бы одного из воздействующих факторов растения угнетаются, а наступление критических условий часто приводит к их гибели. Задачей исследования является установление пространственно-временных закономерностей формирования урожайности картофеля, как одной из

основных сельскохозяйственных культур Брестской области и разработка вероятностного метода прогноза.

Материалы и методы исследования. Основу исследований составили многолетние данные урожайности картофеля с 1960 по 2016 гг. Использованы данные Министерства статистики и анализа Республики Беларусь об урожайности картофеля и материалы Республиканского гидрометеоцентра о среднемесячных атмосферных осадках и температурах воздуха по 16 районам Брестской области. Для описания многолетних колебаний урожайности использованы статистические методы. Вегетационный период принят с мая по август.

Факторы, влияющие на урожайность картофеля, можно условно разделить на две группы: к первой группе относятся плодородие почв, уровень агротехники, сорта культур, антропогенные нагрузки и т.д.; ко второй – климатические условия. Тогда урожайность можно представить как:

$$Y(t) = Y_{\phi}(t) \pm \Delta Y(t), \quad (1)$$

где $Y(t)$ – планируемая урожайность в расчетном календарном году, ц/га; $Y_{\phi}(t)$ – фоновая урожайность в том же году; $\pm \Delta Y$ – отклонение фактической урожайности от фоновой, ц/га.

Влияние технологических факторов с достаточной для практики точностью можно описать многочленом 2, 3 степени или иными непрерывными функциями. Разность между фактической урожайностью и фоновой составит отклонения, которые определяются, в основном, погодными условиями.

Динамика погодной составляющей урожайности $\pm \Delta Y(t)$ может быть представлена в виде аддитивной функции.

$$\Delta Y(t) = u(t) \pm \eta(t), \quad (2)$$

где $u(t)$ – детерминированная функция, $\eta(t)$ – случайная составляющая.

Функцию $u(t)$ часто удается подобрать так, что процесс $\eta(t)$ оказывается значительно более простым, чем $\Delta Y(t)$, и тогда решение задач, связанных с этими процессами, существенно упрощается.

Периодическая составляющая или тренды погодной составляющей урожайности могут быть описаны с помощью различных статистических методов, и в частности:

$$u(t) = f(\Delta P_i, \Delta T_i), \quad (3)$$

где ΔP_i – отклонение атмосферных осадков от нормы в i -ый интервал времени; ΔT_i – отклонение температуры воздуха в i -ый интервал времени.

Случайная составляющая урожайности определяем вероятностным методом, т.е.

$$\pm \eta(P_{\%}) = \bar{\eta} \cdot (\Phi_{P_{\%}} \cdot C_v + 1), \quad (4)$$

где $\bar{\eta}$ – среднее значение случайной составляющей урожайности, ц/га; $\Phi_{P_{\%}}$ – числа Фостера расчетной обеспеченности; C_v – коэффициент вариации.

Используя стандартные статистические методы, находят значения средней величины случайной составляющей ($\bar{\eta}$), коэффициенты вариации (C_v) и

асимметрии (C_s). Причем случайную составляющую находят как для благоприятных по урожайности ($P < 50\%$), так и для неблагоприятных ($P > 50\%$) лет. По найденным параметрам строят теоретическую кривую обеспеченности. Далее используя таблицу случайных чисел путем розыгрыша моделируются значения обеспеченности (P_i). Таким образом, имея некоторый ограниченный объем информации можно получить, при принятом законе распределения, временной ряд урожайности практически неограниченной длины.

Анализ взаимосвязи урожайности и климатических параметров проводился в два этапа. На первом этапе находились отклонения фактической урожайности от фоновой. На втором – анализ полученных временных рядов и агроклиматических показателей.

Пространственная изменчивость исследовалась с помощью карт, построенных для максимальной фоновой урожайности. Максимальная фоновая урожайность определялась путем дифференцирования функции $Y_{\phi}(t)$. На второй стадии выполнялось исследование пространственной изменчивости урожайности по области [1].

Обсуждение результатов. Урожайность определяется наследственными свойствами растений и влиянием энергетического, водного и пищевого режимов почвы и атмосферы. Потребность сельскохозяйственной культуры в тепле, влаге и питании в каждый период вегетационного цикла обусловлены эволюцией и проявляются в виде собственных оптимумов элементов среды. Если комплекс условий среды находится в оптимуме, то растения формируют максимум урожая.

Агроклиматические условия Брестской области благоприятны для возделывания картофеля. Однако климатические характеристики имеют существенную изменчивость как от года к году, так и внутри сезона. Температура воздуха играет немаловажную роль в формировании урожая. На рисунке 1 представлена динамика средней урожайности картофеля по Брестской области за период с 1960 по 2016 гг.

Невысокие урожайности картофеля по Брестской области в начале 60-х годов прошлого столетия были обусловлены отсутствием высокопродуктивных сортов, недостаточным внесением удобрений и т.п. Сочетание благоприятных климатических (режим выпадения осадков в вегетационный период, сумма активных температур) и агротехнических факторов в середине 80-х способствовало получению высоких урожаев. С повышением уровня агротехники, улучшением водно-воздушного и питательного режима почв, с использованием новых сортов урожайность повысилась и пик ее пришелся на 1986 г. Так урожайность картофеля в среднем по области составила 252 ц/га. Меньше всего – в Барановичском районе (214 ц/га), максимум картофеля с 1 га было собрано в Лунинецком районе (311 ц/га). Однако, с конца 80-х и до 2000 г. включительно, наблюдается устойчивая тенденция снижения урожайности. Главными причинами такой тенденции являются ухудшение агротехнического обеспечения вследствие снижения уровня развития экономики республики (внесение минеральных удобрений под картофель к 1999 – 2000 гг. по

отношению к середине 80-х снизилось на 83 %, органических – на 13 %; были сведены к минимуму механизированные и профилактические обработки в технологическом цикле); деградация мелиоративных систем и мелиорированных земель (вследствие ухудшения функционирования существующей мелиоративной сети, больших потерь органического вещества на мелиорированных и прилегающих к ним землях понизился бонитет почв, что не могло не отразиться на урожайности); увеличение случаев экстремальных климатических факторов во время интенсивной вегетации (поздневесенние и летние заморозки, продолжительные засушливые периоды) и другие причины.

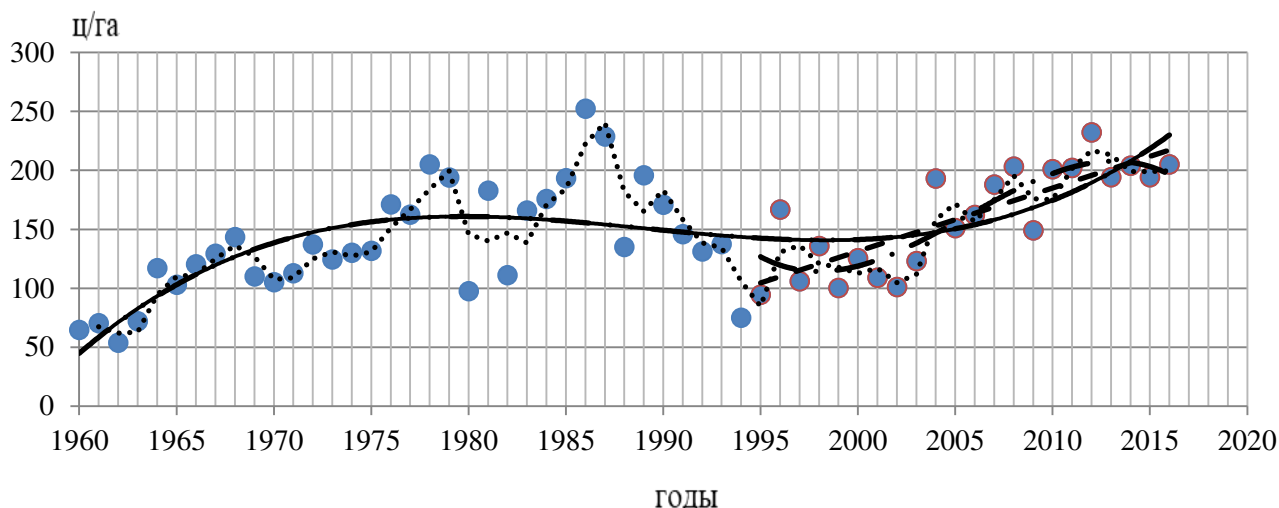


Рисунок 1 – Динамика урожайности картофеля Брестской области:
 – линейный фильтр; ——— – полином 3 степени для всей совокупности выборки; – – – – полином 3 степени на отрезке 1995 – 2016 гг.; - - - - - линейная функция на отрезке 1995 – 2016 гг.

Линия тренда фактической урожайности картофеля для Брестской области описывалась различными функциями, а именно:

– полином 3 степени для всей совокупности выборки –

$$Y_{\phi}(t) = 0,0063 \cdot t^3 - 0,564 \cdot t^2 + 15,308 \cdot t + 30,6, (r=0,71),$$

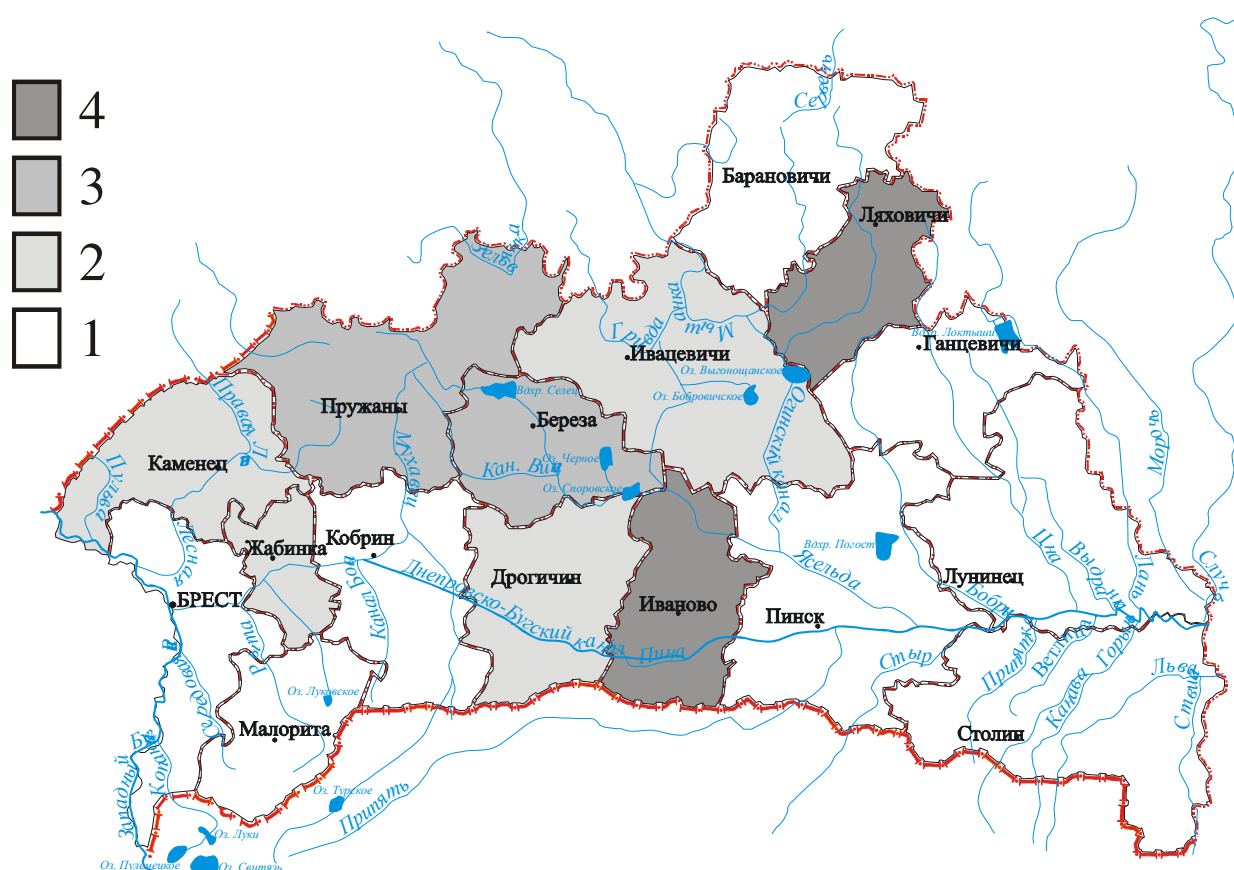
– полином 3 степени на отрезке 1995 – 2016 гг. –

$$Y_{\phi}(t) = -0,0536 \cdot t^3 + 7,487 \cdot t^2 - 339,420 \cdot t + 5143, (r=0,85),$$

– линейная функция на отрезке 1995 – 2016 гг. – $Y_{\phi}(t) = 5,363 \cdot t - 88,5, (r=0,81),$

где t – индекс года, определяемый как $t=T-1959$ (T – календарный год).

Интегрируя данное уравнение, получили максимальную фоновую урожайность картофеля для каждого района области. На основании этих данных построена карта максимальной фоновой урожайности (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Карта максимальной фоновой урожайности картофеля
Брестской области, ц/га:**

1 – более 340, 2 – 340–320, 3 – 320–300, 4 – менее 300.

Для установления градации деления районов по максимальной фоновой урожайности картофеля использовался статистический критерий Стьюдента с помощью которого установлена наименьшая существенная разница для средних величин урожайности по районам. Затем эта величина округлялась до целых величин.

Максимальная фоновая урожайность картофеля по районам Брестской области имеет пестрый характер. В Ивановском и Ляховичском районах она превышает 340 ц/га, в Березовском и Пружанском районах – 320 – 340 ц/га, несколько меньшая максимальная фоновая урожайность (300 – 320 ц/га) имеет место в Дрогичинском, Жабинковском, Ивановском и Каменецком районах, в остальных районах она менее 300 ц/га.

По полученным уравнениям тренда находим отклонения от фактической урожайности. Временные ряды отклонений фактической урожайности картофеля от фоновой подчиняются нормальному закону распределения вероятностей, что подтверждено специальным анализом.

Проведенный регрессионный анализ позволил описать погодную составляющую урожайности анализируемых картофеля полиномом первой степени – $u = 0,289 \cdot \Delta P_8 + 4,445 \cdot \Delta T_5 - 6,616 \cdot \Delta T_7 - 0,202$ ($r=0,54$).

Рассмотрим влияние различных факторов на урожайность картофеля. Результаты расчета показали, что наиболее эффективны температура воздуха мая и июля для картофеля, а также осадки августа. Температура воздуха играет немаловажную роль в формировании урожая. Прорастание почек клубней в почве начинается при 5 – 8 °С, всходы и молодые растения повреждаются при заморозках -2 °С. Оптимальная ночная температура для образования клубней 10 – 13 °С. При 20 °С в почве и выше наступает тепловое вырождение картофеля: удлиняются стебли и боковые побеги, сужаются листовые пластинки, уменьшается содержание хлорофилла в листьях, сокращается урожай и ухудшается его качество. Температура воздуха в мае в значительной мере определяет длину и массу стебля. В жаркую погоду происходит тепловое вырождение картофеля: удлиняются стебли и боковые побеги, сужаются листовые пластинки, уменьшается содержание хлорофилла в листьях, сокращается урожай и ухудшается его качество.

Дефицит почвенной влаги и недостаток питательных веществ тормозят ростовые процессы, листья прекращают рост. Материнские клубни играют существенную роль в водном режиме растений на первых этапах их роста и развития. Запасы влаги материнского клубня, а при дальнейшем росте и молодых клубней играют роль страхового водного фонда, которым покрывается недостаток почвенной влаги в наиболее напряженные периоды. Увлажненность почвы в мае, как правило, достигает и превышает оптимум для картофеля, следовательно, избыток отрицательно сказывается на урожайности. Положительная взаимосвязь существует между скоростью роста и конечной продуктивностью сортов и гибридов. Эти показатели используются для мониторинга формирования урожая и прогнозирования продуктивности растений. Таким образом, наряду с питательными веществами погода в период вегетации картофеля является важнейшим фактором развития. Проверка методики на реальном материале показала хорошую сходимость фактической и рассчитанной урожайности как для области в целом, так и по отдельным районам [1].

Смоделированные таким образом ряды урожайности отличаются от фактических меньшей изменчивостью, поэтому при моделировании необходимо в погодные данные вводить случайную составляющую $\eta(P)$. Случайная составляющая моделируется по формуле (4). Представление о величине случайной составляющей и ее статистических характеристиках полученной как разности между фактической урожайностью и фоновой и погодной составляющей, можно получить из таблицы 1.

Таблица 1 – Случайные составляющие урожайности картофеля

Обеспеченные величины, ц/га				
5	10	25	75	95
57,6	30,5	16,7	-18,9	-42,9

Исходя из физиологических особенностей картофеля наиболее благоприятным является теплый с повышенной влажностью год. Одним из благоприятных по урожайности год для картофеля являлся 1986 г., а наиболее неблагоприятным – 1994 г. Как видно из таблица 2, 1986 г. был по количеству осадков несколько ниже нормы и только в августе осадки значительно превышали ее. В тоже время, температура воздуха на протяжении всего вегетационного периода была выше нормы, что позволило сформироваться максимальному урожаю. 1994 г. напротив был достаточно влажным и холодным. Особо аномальный был июль: засушливый и достаточно жаркий. Резкие перепады тепла и влаги в вегетационный период оказали пагубное влияние на урожайность картофеля.

Таблица 2 – Климатические параметры экстремальных лет

Годы	Месяцы					
	март	апрель	май	июнь	июль	август
1986 (максимальная урожайность)	атмосферные осадки (величина, мм / обеспеченность, %)					
	48,5/77,8	24,4/61,1	73,2/77,8	94,5/64,8	59,6/64,8	55,5/5,6
	температура воздуха (величина, °C / обеспеченность, %)					
	-5,0/63,0	5,2/22,2	12,7/35,2	16,3/35,2	17,7/50,0	14,7/42,6
1994 (минимальная урожайность)	атмосферные осадки (величина, мм / обеспеченность, %)					
	74,9/3,7	69,4/14,8	54,6/25,9	68,2/96,3	30,1/98,1	5,9/48,1
	температура воздуха (величина, °C / обеспеченность, %)					
	1,4/50,0	9,1/20,4	12,3/75,9	15,2/83,8	20,6/13,0	18,3/20,4

Случайные составляющие вносят определенный вклад и должны учитываться при моделировании урожайности.

В пространственно-временных колебаниях урожайности картофеля в Брестской области прослеживается определенная асинхронность, в которую существенный вклад вносит влажностный режим. Асинхронность урожайности картофеля между Брестским и Лунинецким районами (наиболее удаленные друг от друга районы) достигает 1,2. Это соответствует увеличению урожайности на 20 %, хотя имеет место только в неблагоприятные по климатическим условиям годы. Поэтому этот факт необходимо учитывать в прогнозировании урожайности.

Для оценки влияния изменения климата на урожайность картофеля расчетный период разбит на два интервала: с 1960 по 1987 гг. и с 1988 по 2012 гг., для которых построены регрессионные модели. В результате регрессионного анализа были получены полиномы первой степени для описания погодной составляющей урожайности картофеля:

период осреднения 1960 – 1987 гг. –

$$u = 6,86 \cdot \Delta T_6 - 5,47 \cdot \Delta T_7 - 4,60 \cdot \Delta T_8 - 0,25 \cdot \Delta P_7 - 4,24, (r = 0,59);$$

период осреднения 1988 – 2012 гг. –

$$u = -1,783 \cdot \Delta P_3 + 1,112 \cdot \Delta P_4 + 1,161 \cdot \Delta P_5 + 0,453 \cdot \Delta P_6 + 7,775 \cdot \Delta P_8 - 7,775 \cdot \Delta T_4 - 10,420 \cdot \Delta T_7 + 207,06 \cdot (r = 0,83).$$

Проведенный анализ показывает, что за период с 1988 по 2012 гг. произошли существенные трансформации в моделях по сравнению с периодом 1960 – 1987 гг. Произошло увеличение статистически значимых факторов, что свидетельствует об увеличении чувствительности современных сортов картофеля к погодным условиям и в частности к атмосферным осадкам. Это обусловлено в первую очередь потеплением климата, что при культивировании высокоурожайных сортов необходимо особо тщательно выдерживать микроклимат на сельскохозяйственных полях и возрастает роль орошения.

Анализ временных рядов фактической урожайности показывает, что они имеют определенные циклы, характерные для климатических характеристик. По результатам регрессионного анализа с использованием сложной цепи Маркова, получены частные прогнозные модели для оценки урожайности картофеля. В качестве примера, представлена одна из таких моделей для Брестской области в целом –

$$Y(t+1) = 0,365 \cdot Y(t) + 0,276 \cdot Y(t-1) + 56,6, (r=0,52).$$

Заключение. Таким образом, основные результаты работы можно свести к следующему. Детально проанализирована динамика урожайности картофеля по Брестской области и установлены основные факторы, определяющие его урожайность. Показано, что величина асинхронности погодной составляющей урожайности сельскохозяйственных культур особенно велика в неблагоприятные по климатическим условиям годы. Разработана методика прогнозирования урожайности картофеля с заблаговременностью в 1 год, которая позволила получить удовлетворительные результаты при прогнозировании урожайности.

Библиографический список

1. Актуальные проблемы природопользования Брестской области / А.А. Волчек [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 265 с.
2. Дмитренко Ю.А. Климатическая обусловленность урожайности сельскохозяйственных культур Республики Беларусь. – Природные ресурсы № 1, 2004. – С. 26 – 35.
3. Лихацевич А.П., Карнаухов В.Н. Модель динамики урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от изменчивости природно-климатических факторов. – Мелиорация переувлажненных земель. 2005, №2 (54). – С. 108 – 117.
4. Сачок Г.И., Камышенко Г.А. Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси. – Мн.: Бел. наука, 2006. – 243 с.